

література



Навчально-методична

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ  
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

для виконання практичних робіт  
з дисципліни

# **ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ**

**(Модуль 2)**

для аспірантів спеціальності 151 «Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології»

Тернопіль  
2024

Методичні вказівки для виконання практичних робіт з курсу «Інформаційно-вимірювальні системи». Модуль 2. Для аспірантів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / укл. А. Г. Микитишин, І. С. Дідич, А. А. Станько // ТНТУ. – 2024. – 40 с.

Укладачі: Андрій МИКИТИШИН, канд. техн. наук, доц.  
Ірина ДІДИЧ, доктор філософії  
Андрій СТАНЬКО, доктор філософії

Рецензент: Олег ЯСНІЙ, проф., докт. техн. наук.

Відповідальний  
за випуск: Ірина ДІДИЧ, доктор філософії

Схвалено та рекомендовано до друку:

Протокол кафедри КТ №8 від 29.01.2024 р.

Протокол НМК факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії №5 від 08.02.2024 р.

Методичні вказівки призначені для проведення практичних робіт з дисципліни «Інформаційно-вимірювальні системи» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Викладені матеріали приведені з урахуванням модульної системи навчання, рекомендацій до самостійної роботи і індивідуальних завдань, тем лабораторних занять, тестів, екзаменаційних питань, типової форми та вимог для комплексної перевірки знань з дисципліни.

## ЗМІСТ

Практична робота №6 Дослідження теплових вимірювальних перетворювачів.....	4
Практична робота №7 Дослідження п'єзоелектричних вимірювальних перетворювачів.....	14
Практична робота №8 Дослідження тензорезисторних вимірювальних перетворювачів.....	26
Практична робота №9 Алгоритмічна компенсація випадкових похибок інформаційних сигналів у вимірювальному каналу.....	33
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА .....	40

## Практична робота № 6

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

**Метою роботи** є одержання навичків контактного вимірювання температури, вивчення характеристик теплових перетворювачів і знімання їх градууювальних кривих.

#### Загальні відомості

Температура поряд з тиском і об'ємом являє собою одну із трьох основних величин, що характеризують термодинамічний стан речовини, і безпосередньо пов'язана з його внутрішньою енергією.

**Температура** – це статистичне поняття, яке застосовне до систем, що складаються з великої кількості часток, які перебувають у тепловій рівновазі. Енергія часток, усереднена за їхнім числом, визначає температуру об'єкта системи.

Якщо кілька тіл з різними температурами привести в зіткнення, то відбувається теплообмін, що приводить до вирівнювання температур.

Теплообмін здійснюється трьома різними способами:

- а) за допомогою теплопровідності (у твердих тілах);
- б) за допомогою конвекції (рідини й газу);
- в) за допомогою випромінювання.

Тепловими називаються перетворювачі, принцип дії яких заснований на використанні теплових процесів (нагрівання, охолодження, теплообміну) і вхідною величиною яких є температура.

Температура як параметр теплового процесу не піддається безпосередньому вимірюванню.

У той же час вона є функцією стану речовини, безпосередньо пов'язаною із внутрішньою енергією тіла, а через неї і з іншими властивостями. Отже, при зміні температури міняється й багато інших фізичних властивостей тіл (об'ємне розширення тіл при нагріванні; залежність опору речовини від температури, виникнення термо-ЕРС), які можна виміряти.

Засоби вимірювань температури різноманітні й різняться діапазоном вимірювань, типом використовуваного термоперетворювача, наявністю

або відсутністю контакту між термоперетворювачем і об'єктом вимірювань. За останньою ознакою всі засоби вимірювань температури ділять на контактні й безконтактні.

Засоби для безконтактних вимірювань застосовують у випадках, коли вимірювана температура перевищує 2500 °С, коли контакт термоперетворювача з об'єктом вимірювання утруднений або неможливий (об'єкт, що рухається, або вилучений об'єкт, агресивне середовище й т.п.), або коли неприпустиме викривлення температурного поля об'єкта за рахунок розміщення в ньому термоперетворювача.

Для вимірювання температури залежно від її значення, необхідної точності й умов вимірювань можуть бути використані різні прилади. У таблиці (див. додаток А) наведені орієнтовні значення діапазонів вимірюваних температур і досягнута точність вимірювань найпоширенішими приладами для вимірювання температур.

Для вимірювання температури контактними засобами в основному використовують термометри опору й термоелектричні термометри.

1. Метали, призначені для виготовлення чутливих елементів термометрів опору, повинні мати високостабільний ТКО, лінійну залежність опору від температури, гарну відтворюваність значень електричного опору в інтервалі робочих температур, інертність до впливів навколишнього середовища. До таких матеріалів належить платина. Якщо верхня границя температури застосування термометра невисока, то широко застосовуються мідні, вольфрамові й нікелеві терморезистори.

У даній роботі використовується мідний термометр опору КТ2 типу ТСМ. Мідні термометри опору типу ТСМ можуть застосовуватися для тривалого вимірювання температури від – 50 до 200 °С (понад 200 °С мідь інтенсивно окислюється). Основні технологічні дані мідних перетворювачів надано в додатку Б.

До позитивних якостей міді як матеріалу, застосовуваного для виготовлення чутливих елементів термометрів опору типу ТСМ, варто віднести дешевину, простоту одержання такого дроту в різній ізоляції, можливість одержання провідникової міді високої чистоти (сплави мають менше значення ТКО), лінійний характер залежності опору міді від температури. До числа недоліків міді варто віднести малий питомий опір ( $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м) й інтенсивне окиснення при невисоких температурах.

Залежність електричного опору міді від температури в діапазоні від

–50 до – 200 °С підкоряється рівнянню:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

де  $R_t$  і  $R_0$  – опори терморезистора відповідно при температурі  $t$  і  $0$  °С;  
 $\alpha$  – ТКО міді ( $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ C}^{-1}, \text{ K}^{-1}$ ).

Якщо для мідного терморезистора потрібно визначити  $R_2$  (при температурі  $t_2$ ) по відомому опорі  $R_1$  (при температурі  $t_1$ ), то варто користуватися формулою:

$$R_2 = R_1(1 + \alpha t_2) / (1 + \alpha t_1). \quad (1.32)$$

Розглянемо графічну залежність  $R_t = f(t)$  (рис. 1.23).

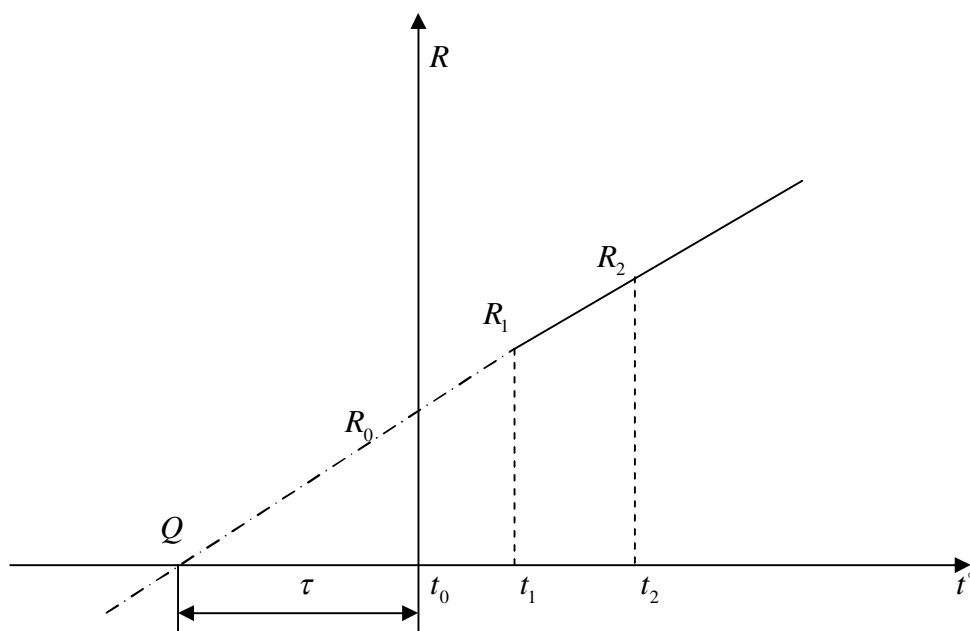


Рисунок 1.23 – Графічна залежність  $R_t = f(t)$

Якщо продовжити пряму  $R_1R_2$  до перетинання з віссю температур у точці  $Q$ , то одержимо ряд подібних трикутників. Звідси знайдемо співвідношення:

$$\frac{R_1}{t_1 + \tau} = \frac{R_2}{t_2 + \tau} = \frac{R_0}{\tau}. \quad (1.33)$$

Фізичний зміст параметра  $\tau$  полягає в тому, що він являє собою ту температуру, яка відповідає нульовому опору терморезистора за умови збереження лінійної залежності до низьких температур.

Із графіка рис. 1.23 можна визначити  $R_0$ , що відповідає  $t = 0$  °С.

Похибки, що виникають при вимірюванні температури термометрами опору, викликаються нестабільністю в часі початкового опору термометра і його ТКО, зміною опору лінії, що з'єднує термометр із вимірювальним приладом, перегрівом термометра вимірювальним струмом (звичайно струм значно менший 10 мА).

2. Напівпровідникові терморезистори мають нелінійну функцію перетворення:

$$R_t = R_{t_{20}} e^{\alpha(t-t_{20})}, \quad (1.34)$$

де  $\alpha = - (0,025 - 0,04) \frac{1}{^\circ\text{C}}$ ;  $t = 20$  °С.

Вони відрізняються від металевих терморезисторів більшими значеннями ТКО, а отже, меншими габаритами, меншою інерційністю, більшою чутливістю. ТКО напівпровідникових терморезисторів негативний і зменшується обернено пропорційно квадрату абсолютної температури.

До числа недоліків напівпровідникових терморезисторів можна віднести такі:

- а) нелінійність залежності від температури;
- б) мала допустима потужність розсіювання при проходженні вимірювального струму;
- в) значний розкид від зразка до зразка як номінального опору, так і ТКО (тобто відсутність взаємозамінності, необхідність індивідуального градуювання).

Похибка вимірювання температури напівпровідниковими терморезисторами залежить в основному від нестабільності його опору, похибки градуювання, похибки перегріву.

У даній роботі використані напівпровідникові терморезистори типу КМТ-17А, СТЗ-1, ММТ-1.

3. При щільному з'єднанні (контакті) двох металевих поверхонь електрони з металу з меншою роботою виходу будуть переходити до

металу з більшою роботою виходу. При цьому виникає контактна різниця потенціалів, значення якої залежить від температури.

Термоелемент складається із двох таких з'єднань (зварених або спаяних); якщо їхні температури однакові, то контактні напруги компенсуються. Якщо контактні з'єднання мають різну температуру, то виникає термо-ЕРС, що викликає термострум. Його значення залежить від опору ланцюга, матеріалів і різниці температур. Термоелектричний метод вимірювання температур заснований на суворій залежності термо-ЕРС від температури.

До термоелектродних матеріалів, призначених для виготовлення термопар, пред'являють ряд вимог: однозначна, бажано близька до лінійної, залежність термо-ЕРС від температури; стабільність і відтворюваність термоелектричної характеристики; висока чутливість, жаростійкість і механічна міцність; хімічна інертність; термоелектрична однорідність.

Функція перетворення термопари:

$$E(t, t_0) = f(t) - f(t_0), \quad (1.35)$$

де  $E(t, t_0)$  – термо-ЕРС перетворювача;

$f(t), f(t_0)$  – функції температур робочого спаю й вільних (холодних) кінців термопари.

### **Дослід 1. Вимірювання температури мідним терморезистором**

На рисунку 1.24 зображено макет для контролю основних характеристик теплових перетворювачів у діапазоні від 0 до 110 °С.

Термопари й терморезистори можуть бути підключені до зовнішнього приладу безпосередньо або за допомогою перемикачів К1 і К2 відповідно.

У даному досліді температуру масла вимірюють за допомогою мідного терморезистора  $R_{T_2}$ .

### **Порядок виконання дослідів**

**Увага!** Дослід 1, дослід 2, дослід 3 виконуються одночасно.

1. До клем лабораторного макета (рис. 1.24) підключити прилад для вимірювання опору (границя вимірювання).



2. Перемикач K1 перевести в положення 2.
3. Після перевірки схеми викладачем підключити прилад до мережі.
4. Включити тумблер ВКЛ на панелі макета, при цьому повинна засвітитися лампочка сигналізації.
5. Виміряти опір мідного терморезистора при різній температурі масла.
6. Діапазон і крок вимірювань задає викладач.
7. Результати вимірювань занести в табл. 1.19.
8. Побудувати графік  $R_2 = f(t)$ , за ним, використовуючи графічні побудови, визначити значення  $R_0$ ,  $\tau$  для обраної лінійної ділянки графіка. Визначити клас точності мідного терморезистора.

Градувальні значення мідного терморезистора й припустимі відхилення від номінальних значень опору ТСМ дані в додатку Б.

Таблиця 1.19 – Результати дослідів

Ртутний термометр $t$ , °С	Опір мідного терморезистора $R_2$ , Ом	Градувальні значення $R_{2Г}$ , Ом	$\delta = \frac{R_2 - R_{2Г}}{R_{2Г}} \cdot 100 \%$

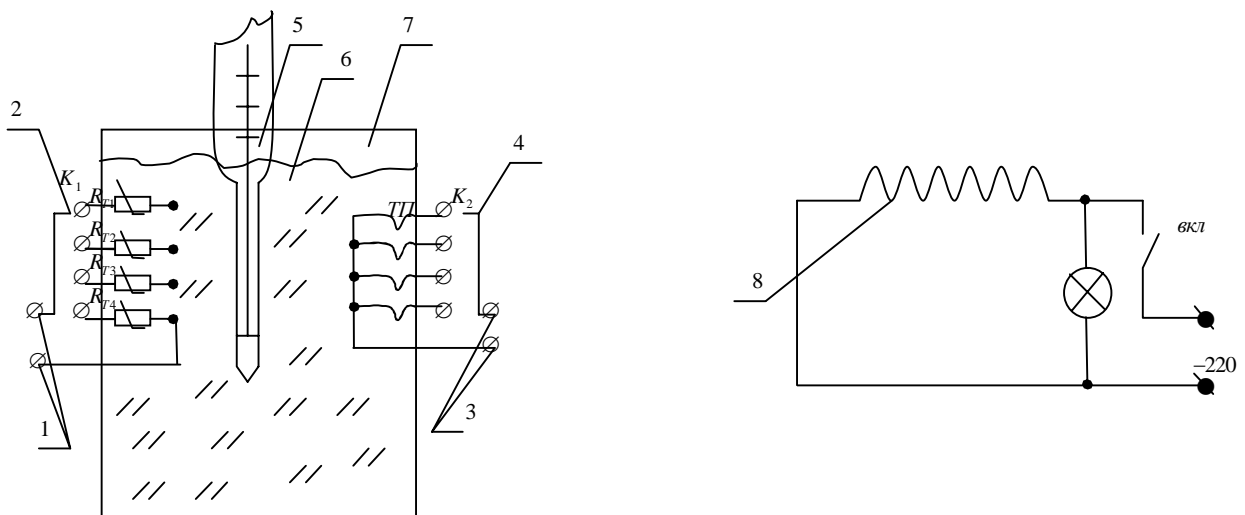


Рисунок 1.24 – Зовнішній вигляд і електрична схема макета для контролю характеристик теплових перетворювачів :

- 1 – клеми підключення терморезисторів; 2 – перемикач підключення терморезисторів  $K_1$ ; 3 – клеми підключення термопар; 4 – перемикач підключення термопар  $K_2$ ; 5 – термометр; 6 – масло; 7 – колба; 8 – нагрівач

## Дослід 2. Вимірювання температури напівпровідниковим терморезистором

У даному досліді температуру масла вимірюють напівпровідниковими резисторами  $R_{T_1}$ ,  $R_{T_3}$ ,  $R_{T_4}$ .

### Порядок виконання досліді

1. Дослід 2 проводиться аналогічно досліді 1. Перемикач  $K_1$  ставимо в положення 1, 3, 4 і проводимо вимірювання.
2. Результати вимірювань занести в табл. 1.20.
3. Побудувати графіки  $R = f(t)$ ,  $R_p = f(t)$ .

Таблиця 1.20 – Результати досліді

Ртутний термометр $t$ , °С	Опір п/п терморезистора $R$ , кОм $R_1, R_3, R_4$	Опір п/п терморезистора $R_p$ , кОм (розрахункове)	$\delta = \frac{R - R_p}{R_p} \cdot 100 \%$

## Дослід 3. Вимірювання температури термоелектричним перетворювачем

У даному досліді температуру масла вимірюють різними видами термопар.

### Порядок виконання досліді

1. До клем III і IV лабораторного макета підключити прилад для вимірювання ЕРС.
2. Перемикач  $K_2$  установити в положення 1, 2, 3 або 4 (за завданням викладача).
3. Підключити прилад до мережі.
4. Виміряти ЕРС термопар при різній температурі масла.

5. Діапазон і крок вимірювання задає викладач.
6. Результати вимірювань занести в таблицю 1.21. Градуювальні значення стандартних термопар наведено в додатку В.
7. Побудувати графіки  $E = f(t^\circ)$ ,  $E_\Gamma = f(t^\circ)$ .

Таблиця 1.21 – Результати досліду

Ртутний термометр $t$ , °С	Вимірювана термо-ЕРС, $E$ , мВ	Градуювальне значення стандартної термопари, $E_\Gamma$	$\delta = \frac{E - E_\Gamma}{E_\Gamma} \cdot 100 \%$

### Зміст звіту

У звіті повинні бути наведені таблиці експериментальних даних, за даними вимірювань і обчислень побудувати графіки, зазначені в описі дослідів.

### Контрольні запитання

1. Які існують методи вимірювань температури?
2. Чому чутливий елемент первинного вимірювального перетворювача значною мірою визначає головні його можливості?
3. Назвіть теплові чутливі елементи, обґрунтуйте можливі границі їхнього використання.
4. Перелічіть переваги й недоліки металевих термометрів.
5. Перелічіть переваги й недоліки напівпровідникових термо-резисторів.
6. Поясніть суть термоелектричного методу вимірювання.

## ДОДАТОК А

Прилади для вимірювань температури	Діапазон вимірювань, °С	Досягнута похибка, %
<b>Контактні</b>		
Термометри опору з терморезисторами:		
із благородних металів	-260 ÷ 1300	±0,002
з неблагородних металів	- 200 ÷ 200	±0,5
з напівпровідникових матеріалів	-270 ÷ 300	±1,0
Термометри опору з термотранзисторами		
Кварцові термометри	- 60 ÷ 100	±1,0
Термоелектричні термометри з термопарами:		
із благородних металів	- 50 ÷ 100	±0,05
з неблагородних металів	- 20 ÷ 1800	±0,1
з напівпровідникових матеріалів	- 200 ÷ 1300	±1,0
	0 ÷ 2500	±1,0
<b>Безконтактні</b>		
Пірометри випромінювання:		
радіаційні	20 ÷ 4000	±1,0
оптичні (яскравісні)	700 ÷ 10000	±0,5
кольорові	900 ÷ 300	±1,0

## ДОДАТОК Б

Таблиця Б1 Градувальна таблиця для мідних термометрів опору

Температура, °С	Опір, Ом
1	2
-50	41,71
-40	43,97
-30	46,23
-20	48,48
-10	50,74
0	53,00
10	55,26
20	57,52
30	59,77

Продовження таблиці Б1 :

1	2
40	62,03
50	64,29
60	66,55
70	68,81
80	71,06
90	73,32
100	75,58
110	77,84
120	80,09
130	82,35

Таблиця Б2 Припустимі відхилення, %, від номінальних значень опору, металевих термоперетворювачів опору (при 0 °С)

Тип	Клас точності				
	I	II	III	IV	V
ТСП	±0,05	±0,1	±0,4	±0,2	±0,8
ТСМ		±0,1	±0,5	±0,2	±1,0

**ДОДАТОК В**

Температура робочого кінця спаю, °С	Термо-ЕРС, мВ			
	ТП мідь- константан	ТП залізо- константан	ТП хромель- копель	ТП хромель- алюмель
30	1,196	1,536	1,801	1,203
40	1,611	2,058	2,419	1,611
50	2,035	2,585	3,047	2,022
60	2,467	3,115	3,683	2,430
70	2,908	3,649	4,329	2,850
80	3,357	4,186	4,983	3,266
90	3,813	4,725	5,646	3,681
100	4,277	5,268	6,317	4,095
110	4,749	5,812	6,996	4,508
120	5,227	6,359	7,683	4,919
130	5,712	6,907	8,377	5,327

## Практична робота № 7

### ДОСЛІДЖЕННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

**Метою роботи** є ознайомлення із принципом роботи, будовою п'єзореzonансного перетворювача “температура-частота” і визначення основних характеристик даного перетворювача.

#### Загальні відомості

П'єзоелектричними називаються кристали й текстури, що електризуються під дією механічних напруг (прямий п'єзоэффект) і деформуються в електричному полі (зворотний п'єзоэффект). П'єзоэффект має знакочутливість, тобто відбувається зміна знака деформації при зміні напрямку поля.

П'єзоелектричні властивості мають багато кристалічних речовин: кварц, турмалін, ніобат літію, сегнетова сіль й ін., а також штучно створювані й спеціально поляризовані в електричному полі п'єзокераміки: титанат барію, титанат свинцю й ін.

Оборотність п'єзоелектричного ефекту дозволяє виконувати п'єзореzonатор у вигляді двополюсника, що поєднує системи електричного збудження механічних коливань і знімання електричного сигналу. Резонансні коливання в п'єзоелементі виникають у результаті встановлення в ньому стоячих ультразвукових хвиль. Довжина хвилі

$$\lambda = v/f ,$$

де  $v$  – швидкість поширення ультразвуку,

$f$  – частота випромінювання.

Якщо довжина хвилі  $v$  – така, що на відрізку  $h$  між гранями, від яких відбиваються хвилі, укладається ціле число напівхвиль, то в п'єзоелементі встановлюються стоячі хвилі. Стоячим хвилям відповідає частота збуджуючої напруги

$$f_{\text{пр}} = \frac{n}{2h} \sqrt{\frac{E_{ij}}{\rho}} ,$$

де  $n$  – кількість напівхвиль, що уклалися;  
 $E_{ij}$  – константа пружності матеріалу;  
 $\rho$  – густина матеріалу.

Частота коливань, при яких на довжині  $h$  укладається одна напівхвиля, є резонансною (основною) частотою й дорівнює

$$f_{\text{пр}} = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{E_{ij}}{\rho}} .$$

Основою досліджуваного п'єзорезонансного частотного перетворювача є п'єзорезонатор, частота якого змінюється під впливом температури, що впливає на геометричні розміри, густину, і, головним чином, на пружні властивості кварцу. Сучасні кварцові резонатори розраховані на застосування в діапазоні частот 1кГц – 200МГц. Перекриття такого широкого діапазону частот можливо лише при використанні п'єзоелементів, які значно відрізняються один від одного. Так, мінімальна товщина п'єзоелемента становить приблизно 0,05 мм (елементи меншої товщини німецькі й нетехнологічні), а максимальний розмір досягає 50 мм. Залежно від вибору частотовизначальних розмірів п'єзоелемента вдається змінювати частотний діапазон у 1000 разів.

За конструктивним виконанням (видом герметизації) кварцові резонатори поділяються на дві групи: вакуумні (залишковий тиск менше  $10^{-3}$  мм рт.ст.) і герметизовані, а за функціональним призначенням – генераторні (для застосування в схемах генераторів), а також фільтрові.

Генераторні резонатори залежно від рівня точності настроювання й стабільності частоти підрозділяються на резонатори загального типу й прецизійні, термостатовані (для використання разом із термостатом) і термокомпенсовані (для схем генераторів з термокомпенсацією).

До прецизійних належать резонатори із припустимим відхиленням робочої частоти від номінальної  $3 \cdot 10^{-6}$  Гц і менше, і зміною частоти в часі, що не перевищує  $10^{-8}$  Гц за тиждень (або  $10^{-9}$  Гц у добу).

У досліджуваному перетворювачі використовується герметизований ТКР LC- зрізу з коливаннями за товщиною.

## Основні характеристики перетворювача «температура-частота»

До основних характеристик перетворювача належать:

1. Термочутливість – залежність резонансної частоти п'єзоелектричного резонатора від температури, Гц/°С.

$$S = C_\theta = \left. \frac{\partial f}{\partial \theta} \right|_{\theta = \theta_0}.$$

Кількісно термочутливість прийнято оцінювати через коефіцієнт термочутливості  $C_\theta$ , який визначений при фіксованій температурі  $\theta_0$  і чисельно дорівнює похідній від частоти  $f$  за температурою.

2. Для порівняння за термочутливістю резонаторів з різними робочими частотами зручно користуватися поняттям температурного коефіцієнта частоти (ТКЧ), °С<sup>-1</sup>

$$\text{ТКЧ} = T_f = \frac{\partial f}{f \partial \theta}.$$

Коефіцієнти  $C_\theta$  й ТКЧ однозначно пов'язані між собою співвідношенням

$$C_\theta = T_f \cdot f.$$

Залежність частоти резонатора від температури  $f(\theta)$  називається температурно-частотною характеристикою (ТЧХ). Експериментально встановлено [1], що ТЧХ будь-якого кварцового резонатора має форму квадратичної або кубічної параболи або прямої лінії й з достатньою для практики точністю може в діапазоні температур від – 200 до + 200 °С бути подана у вигляді полінома третього ступеня:

$$\begin{aligned} f(\theta) &= f_0 \left[ 1 + \sum_{n=1}^3 \dot{\Delta}_f^{(n)} (\theta - \theta_0)^n \right] = \\ &= f_0 \left[ 1 + \dot{\Delta}_f^{(1)} \cdot (\theta - \theta_0) + \dot{\Delta}_f^{(2)} \cdot (\theta - \theta_0)^2 + \dot{\Delta}_f^{(3)} \cdot (\theta - \theta_0)^3 \right] \end{aligned} \quad (1.36)$$



де  $T_f^{(1)} = \left. \frac{\partial f}{\partial \theta f_0} \right|_{\theta = \theta_0}$ ;  $T_f^{(2)} = \left. \frac{\partial^2 f}{2\partial \theta^2 f_0} \right|_{\theta = \theta_0}$ ;  $T_f^{(3)} = \left. \frac{\partial^3 f}{6\partial \theta^3 f_0} \right|_{\theta = \theta_0}$  – ТКЧ першого, другого й третього порядків.

Для реалізації перетворювачів, що мають лінійну ТЧХ, необхідно, як це видно з (1.36), виконання одночасно двох умов:

$$T_f^{(2)} = 0; \quad T_f^{(3)} = 0.$$

Ці властивості має температурний коефіцієнт опору (ТКО)  $LC$  – зрізу (від англ. Linear coefficient – лінійний коефіцієнт). Для  $LC$  – зрізу температурний коефіцієнт індуктивності (ТКІ), близький до  $36 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

#### 1. Градувальна характеристика перетворювача

$$\begin{aligned} f(\theta) &= f_1(\theta) - f_2 = f_1(\theta) - f_2 + \Delta f = \\ &= f_1(\theta) - f_2 + T_f \cdot f_1(\theta) \cdot \theta = f(\theta) + C_\theta \cdot \theta, \end{aligned}$$

де  $f_1(\theta)$ ,  $f_2$  – вихідні частоти вимірювального Г1 і опорного Г2 генераторів, Гц;

$f_1(\theta_0)$  – частота вимірювального генератора при температурі калібрування термочутливого кварцового резонатора ( $\theta_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ), Гц;

$\theta$  – поточне значення температури,  $^\circ\text{C}$ .

#### 2. Похибка перетворювача

$$\gamma = \frac{f_D(\theta) - f_\Gamma(\theta)}{f_\Gamma(\theta_K) - f_\Gamma(\theta_H)} \cdot 100 \% \quad (1.37)$$

де  $f_{\bar{A}}(\theta)$  – значення вихідної частоти перетворювача;

$f_{\bar{A}}(\theta)$  – дійсне значення вихідної частоти перетворювача, отримане з дослідних даних;

$f_{\bar{A}}(\theta_{\hat{E}})$ ,  $f_{\bar{A}}(\theta_{\hat{I}})$  – вихідні частоти перетворювача, що відповідають початковому і  $\theta_H$  кінцевому  $\theta_K$  значенням вимірюваних температур.

## Принцип дії й будова п'єзокварцового перетворювача «температура-частота»

Структурну схему досліджуваного перетворювача наведено на рис. 1.25.

Він складається з вимірювального  $\Gamma_1$  і опорного  $\Gamma_2$  генераторів електричних коливань, змішувача частот ЗЧ, фільтра низьких частот ФНЧ, підсилювача ВП і блоку живлення БЖ.

Вимірювана температура сприймається термочутливим кварцовим резонатором ТКР, що є частотоподавальним елементом вимірювального генератора. Таким чином, зміна температури  $\theta$  на величину  $\Delta\theta$  викликає зміну частоти  $f_1(\theta)$  вимірювального генератора на величину  $\Delta f$ . Опорний генератор виробляє електричні коливання стабільної частоти  $f_2$ , близької до частоти  $f_1(\theta)$  вимірювального генератора при температурі калібрування ТКР, що дорівнює  $\theta = 0$  °С. Частоти  $f_1(\theta)$  й  $f_2$  подаються на змішувач ЗЧ, у якому формується вихідний сигнал перетворювача:

$$f(\theta) = f_1(\theta) - f_2.$$

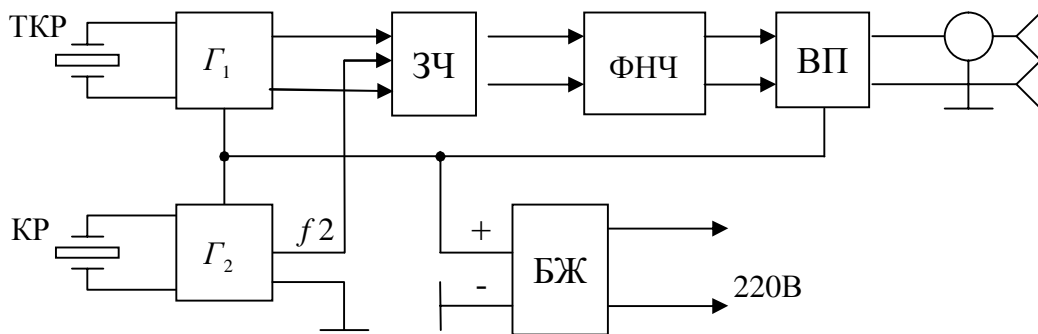


Рисунок 1.25 – Структурна схема п'єзокварцового перетворювача

Після заглушення вищих гармонік і посилення цей сигнал може бути виміряний стандартним електронно-лічильним частотоміром або переданий для реєстрації й керування.

Вимірювальний генератор перетворювача (рис. 1.26) зібраний за ємнісною триточною схемою на транзисторі  $VT1$ . На транзисторі  $VT2$  побудовано істоковий повторювач.

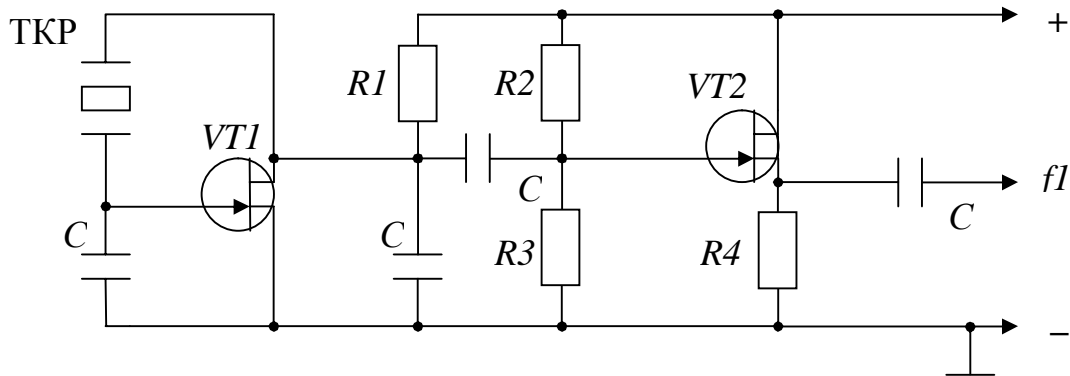


Рисунок 1.26 – Вимірювальний генератор перетворювача

Опорний генератор виконано за аналогічною схемою (рис. 1.26) з термостабільним кварцовим резонатором.

Змішувач частот (рис. 1.27) зібрано на транзисторах  $VT3$ ,  $VT4$  у сполученні з емітерним повторювачем на транзисторі  $VT5$ .

Фільтр низької частоти (рис. 1.27) побудовано за  $\Gamma$ -подібною схемою на елементах  $L1$ ,  $L2$ ,  $C8$ ,  $C9$ .

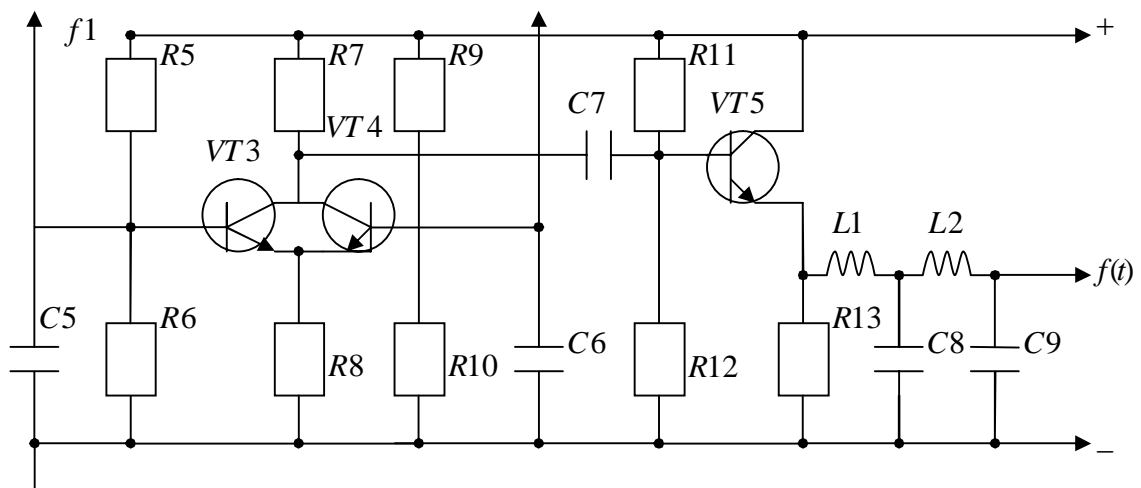


Рисунок 1.27 – Змішувач частот і ФНЧ

Підсилювач (рис. 1.28) виконано на двох транзисторах  $VT_6$ , включеному за схемою із загальним емітером, і  $VT_7$ , включеним за схемою із загальним колектором.

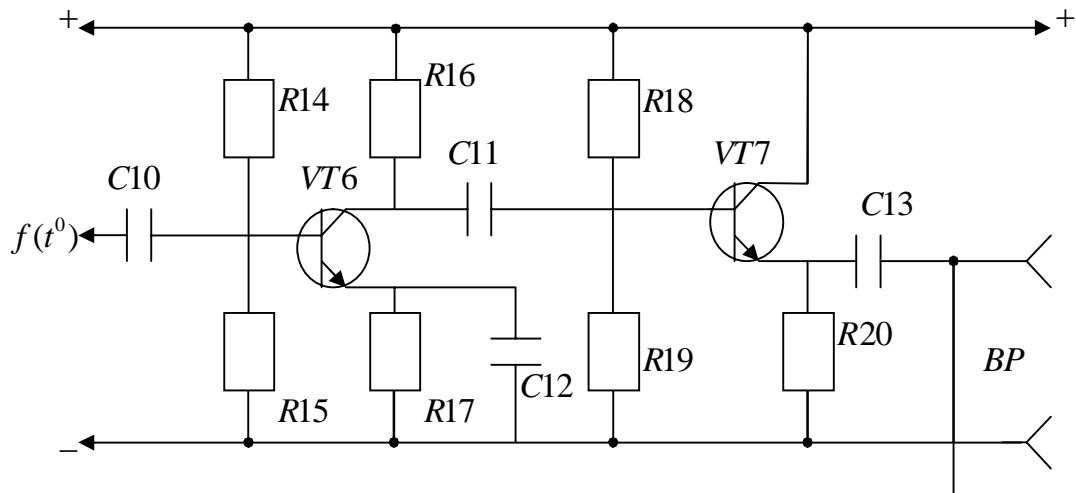


Рисунок 1.28 – Підсилювач

### Опис лабораторного макета для дослідження перетворювачів « температура-частота »

Лабораторний макет (рис. 1.29) складається із пристрою п'єзокварцового перетворювача «температура-частота» і стандартного електронно-лічильного частотоміра ЧМ із робочим діапазоном  $10-10^6$  Гц (наприклад, ЧЗ-33, ЧЗ-34).

Пристрій містить перетворювач «температура-частота» і термостат Т, у якому перебувають термочутливі кварцові резонатори (ТКР). Підігрів і підтримка температури в термостаті здійснюються відповідно термоелектричним нагрівачем ТЕН і контактним термометром (КТ) із керуючим блоком КБ. Установка необхідних значень температури здійснюється регулятором Р за верхньою шкалою контактного термометра.

На передній панелі стенда розташовані такі елементи: В1 – мережний вимикач; МЗ – мережний запобіжник; Л1 – лампа, що сигналізує про включення пристрою; В2 – вимикач термостата; Л2 – лампа, що сигналізує про включення термостата Т; КТ – контактний термометр із регулятором Р; ВР – вихідний рознімання перетворювачів (рис. 1.30).

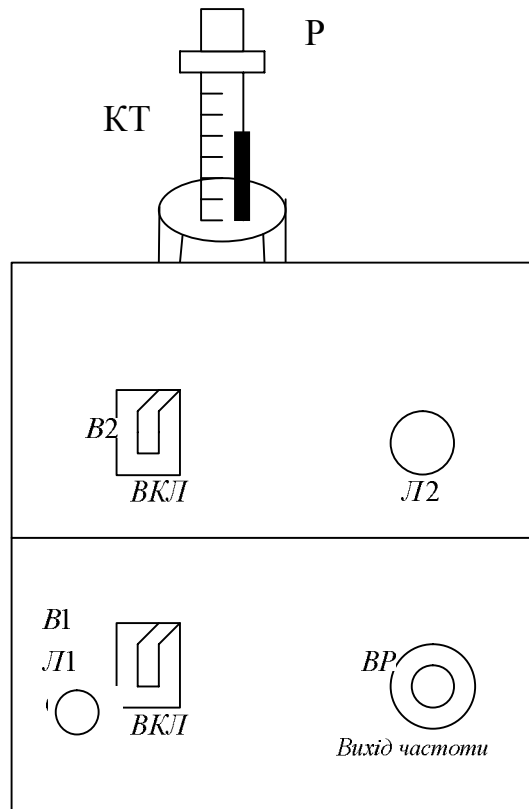


Рисунок 1.29 – Зовнішній вигляд лабораторного макета

### Порядок виконання роботи

1. Установити вимикачі В1, В2 і мережний вимикач частотоміра в положення ОТКЛ.
2. Підключити стенд і частотомір до мережі.
3. З'єднати кабелем гніздо ВХІД частотоміра з вихідним розніманням ВР.
4. Вимикач В1 і мережний вимикач частотоміра перевести в положення ВКЛ. При цьому повинні засвітитися лампа Л1 й індикаторна лампа частотоміра.
5. Регулятором Р установити задатчик контактного термометра на поділку 30°C верхньої шкали.
6. Включити термостат, установивши вимикач В2 у положення ВКЛ. При цьому повинна засвітитися сигнальна лампа Л2 і ввімкнутися лампа підсвічування шкали контактного термометра. Коли температура в термостаті досягає значення, установленого на шкалі КТ, відбувається відключення термоелектричного нагрівача термостата й відключення

лампи підсвічування шкали КТ. Протягом 10 – 15 хв після цього в термостаті відбувається стабілізація температури в межах  $(30 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ , про що свідчить періодичне миготіння підсвічування КТ приблизно один раз на секунду.

7. Після установки в термостаті температури  $(30 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$  прогріти ТКР до одержання стабільної частоти перетворювача (зміна частоти не повинна перевищувати  $\pm 5$  Гц) і занести три довільно взятих показання частотоміра (дійсні значення частот перетворювача  $f'_d(\theta)$ ,  $f''_d(\theta)$ ,  $f'''_d(\theta)$ ) у табл. 1.22.

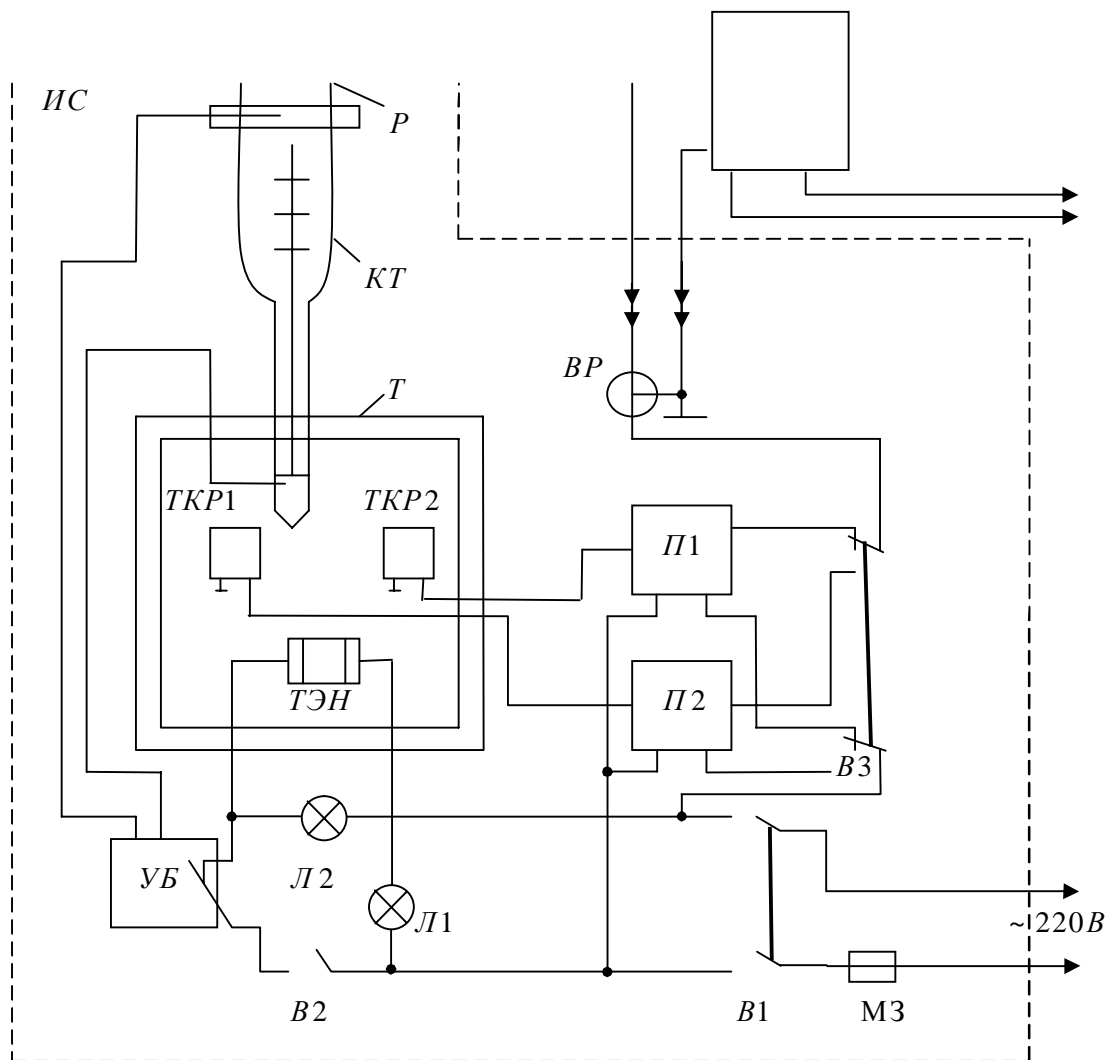


Рисунок 1.30 – Передня панель стенда

Таблиця 1.22 – Дані дослідів

$\theta, ^\circ\text{C}$	30	40	50	60	70	80	90	100
$f'_d(\theta), \text{Гц}$								
$f''_d(\theta), \text{Гц}$								
$f'''_d(\theta), \text{Гц}$								
$\bar{f}_d(\theta), \text{Гц}$								

8. Визначити й занести в табл.1.20 середнє значення частоти перетворювача при температурі 30 °С:

$$\bar{f}_d(30) = \frac{1}{3} [f'_d(30) + f''_d(30) + f'''_d(30)].$$

9. Регулятором Р послідовно встановити на шкалі контактного термометра інші значення температур, зазначені в табл.1.20. Для кожної із цих температур за методикою, наведеною в пунктах 6,7,8, визначити й занести в табл.1.22 значення частот  $f'_d(\theta)$ ,  $f''_d(\theta)$ ,  $f'''_d(\theta)$  і  $\bar{f}_d(\theta)$ . Значення  $\bar{f}_d(\theta)$  занести також у табл.1.23.

10. Визначити рівняння градууювальної характеристики перетворювача за отриманим значенням  $f_d(\theta)$ . Це рівняння являє собою лінійну функцію, визначену за вісьмома ( $n=8$ ) значеннями  $\bar{f}_d(\theta)$ , і відповідно до методу найменших квадратів, має такий вигляд:

$$f_r(\theta) = f_r(\theta_0) + S \cdot \theta = \bar{f}_d - S(\bar{\theta} - \theta),$$

де  $\bar{f}_d = \frac{1}{8} [\bar{f}_d(30) + \bar{f}_d(40) + \dots + \bar{f}_d(100)]$  – середнє значення частоти, Гц;

$$\bar{\theta} = \frac{1}{2} [100 + 30] = 65 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ – середнє значення температури;}$$

$$S = \left\{ \bar{f}_d(70) - \bar{f}_d(60) + 3[\bar{f}_d(80) - \bar{f}_d(50)] + 5[\bar{f}_d(90) - \bar{f}_d(40)] + 7[\bar{f}_d(100) - \bar{f}_d(30)] \right\}$$

$6\left[n(n^2 + 1)\Delta\theta\right]^{-1}$  – чутливість перетворювача, Гц/°С;

$\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$  – крок за шкалою температур;

$f_r(\theta) = \bar{f}_d - S \cdot \bar{\theta}$  – значення вихідної частоти перетворювача при температурі  $0^\circ\text{C}$ .

Таблиця 1.23 – Результати розрахунків

$\theta, ^\circ\text{C}$	0	30	40	50	60	70	80	90	100
$\bar{f}_d(\theta), \text{Гц}$									
$f_r(\theta), \text{Гц}$									
$\gamma, \%$									
$\sigma, ^\circ\text{C}^{-1}$									

11. Підставляючи в рівняння градуовальної характеристики значення температур, наведені в табл. 1.23, визначити й занести в таблицю градуовальні значення частот  $f_r(\theta)$ , що відповідають цим температурам. За отриманими значеннями  $f_r(\theta)$  і  $\bar{f}_d(\theta)$  визначити й занести в табл. 23 значення відносних похибок перетворення для кожної температурної точки

$$\gamma_r = \frac{f_d(\theta) - f_r(\theta)}{f_r(100) - f_r(30)} \cdot 100\%.$$

12. За рівнянням (1.37) визначити й занести в табл.1.21 значення температурного коефіцієнта частоти  $\sigma$  для ТК досліджуваного перетворювача, знаючи, що частота опорного генератора  $f_2 = 14 \cdot 10^6$  Гц.

13. За даними табл.1.23 побудувати градуовальну  $f_r(\theta)$  й дійсну  $f_d(\theta)$  характеристики досліджуваного перетворювача (рис. 1.31).

У звіті навести схему досліджуваного перетворювача (рис. 1.25), табл.1.22 і табл.1.23, рівняння градуовальної характеристики, значення чутливості  $S$  і найбільшої похибки  $\gamma_{\text{пм}}$  перетворювача.



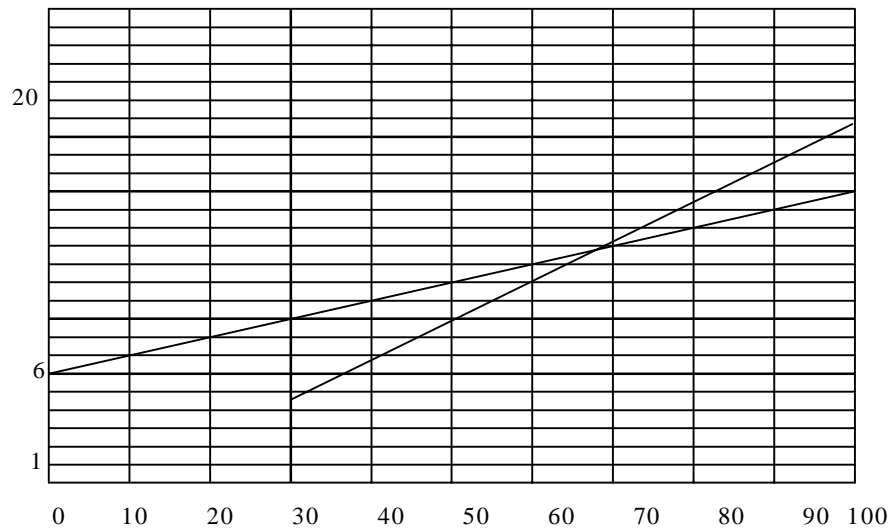


Рисунок 1.31 - Характеристика досліджуваного перетворювача

### Контрольні запитання

1. Принцип дії, будова й основні характеристики п'єзокварцових перетворювачів "температура-частота".
2. Основні типи термочутливих кварцових резонаторів, їхні характеристики й будова.
3. Основні вимоги до вимірювального й опорного генераторів, їхньої схеми.
4. Призначення й будова змішувача частот, фільтра низьких частот і підсилювача.
5. Будова установки для дослідження перетворювачів "температура-частота". Рівняння градуювальної характеристики досліджуваного перетворювача. Послідовність визначення цієї характеристики на установці.
6. Визначення чутливості досліджуваного перетворювача. Причини відхилення дійсної характеристики від градуювальної. Визначення похибки перетворювача й температурного коефіцієнта частоти ТКР.

## Практична робота № 8

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

**Мета роботи:** ознайомлення із принципом дії й будовою установки з балкою рівного опору для тарування тензорезисторів, дослідження серії тензорезисторів, набуття навичок тарування й визначення основних характеристик тензорезисторів.

#### Загальні відомості

Підготовка промислових тензорезисторів до експлуатації містить у собі їхню перевірку й сортування за опором і коефіцієнтом тензочутливості.

Визначення цих параметрів виконується вибірково для 3-5 % від загальної кількості тензорезисторів однієї серії. Результати поширюються на всю серію тензорезисторів одного опору й ідентичної технології виготовлення. Це робиться тому, що навіть в одній серії тензорезисторів їхні характеристики, такі як значення опору й коефіцієнта тензочутливості, можуть мати істотні розходження.

У промислових установках для визначення цих характеристик використовуються тарувальні установки із пружними балками рівного перетину, на яких закріплюються досліджувані тензорезистори [1,2]. Недоліком таких установок є залежність деформації балки, а отже й тензорезистора, від вибору місця робочої точки на поверхні балки. Оскільки габарити (база) більшості тензорезисторів становлять 5-30 мм, їхня деформація при закріпленні на балці рівного перетину нерівномірна, що призводить до більших похибок вимірювання опору й коефіцієнта тензочутливості.

Електрична схема (рис. 1.32) дозволяє визначити й зіставити зміну опорів тензорезисторів за допомогою цифрового процентного омметра (ЦО) типу Щ 30-04.1 з похибкою вимірювання  $\pm 0,2$  % і досліджувати найпоширеніші чверть-, полу- й повномостові схеми включення тензорезисторів за допомогою цифрового вольтметра (ЦВ) типу Щ1516 з похибкою вимірювання  $\pm 0,1/0,5$  %. До схеми входять: постійні

високоточні резистори  $R1-R4$  типу 35-5 В с номінальним опором 200 Ом і похибкою  $\pm 0,2\%$ ; стабілізоване джерело живлення – ДЖ з постійною напругою ( $5,0 \pm 0,5$ ) В; інструментальний підсилювач – ІП. Резистори  $R1-R4$  і досліджувані тензорезистори  $R5-R8$ , залежно від режиму роботи, підключаються до схеми за допомогою перемикачів  $S1-S4$ .

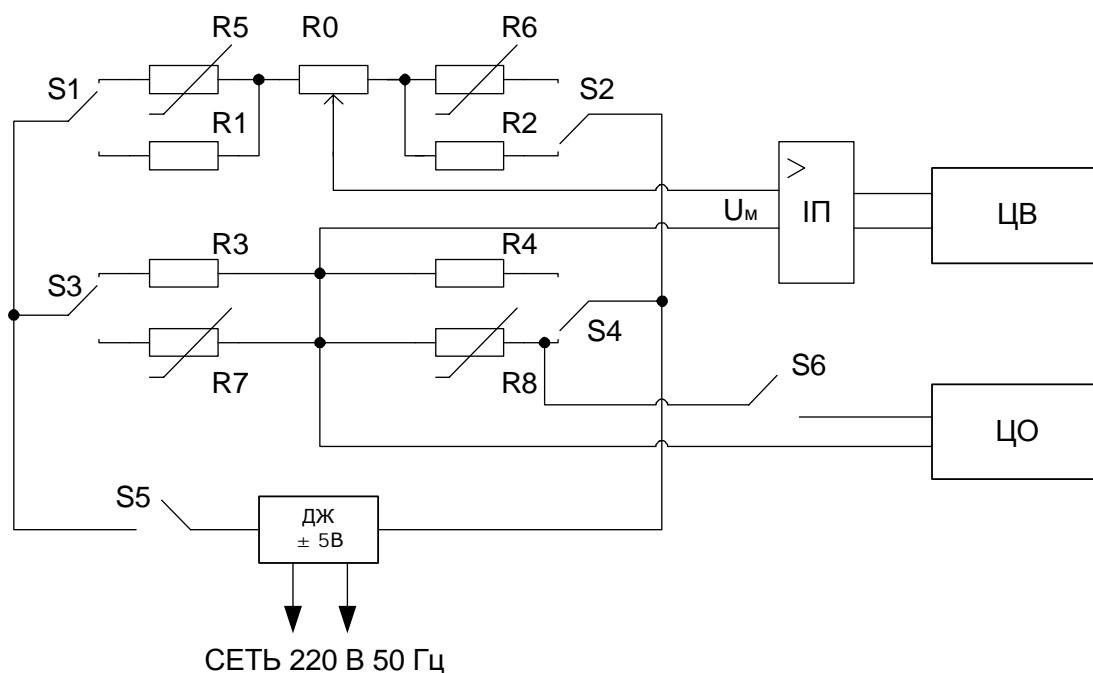


Рисунок 1.32 – Електрична схема тарувальної установки

Як об'єкт дослідження використовується тарувальна установка з балкою рівного опору, пружна деформація якої при прогині вільного кінця однакова в будь-якій точці її поверхні. Установка, схематичне зображення якої наведене на рис. 1.33, складається з таких елементів: консольної балки рівного опору – 1, на поверхні якої закріплені досліджувані тензорезистори – 2. Деформація балки, а отже й тензорезистора, здійснюється за допомогою мікрометричного гвинта – 3. Для вимірювання переміщення кінця балки в діапазоні  $\pm 5$  мм використовується індикатор – 4 годинникового типу із ціною поділки 0,1 мм.

Змінюючи положення перемикачів, можна одержати різні схеми включення, наприклад чвертьмостову. Балансування схеми здійснюється за допомогою реохорда  $R0$ .

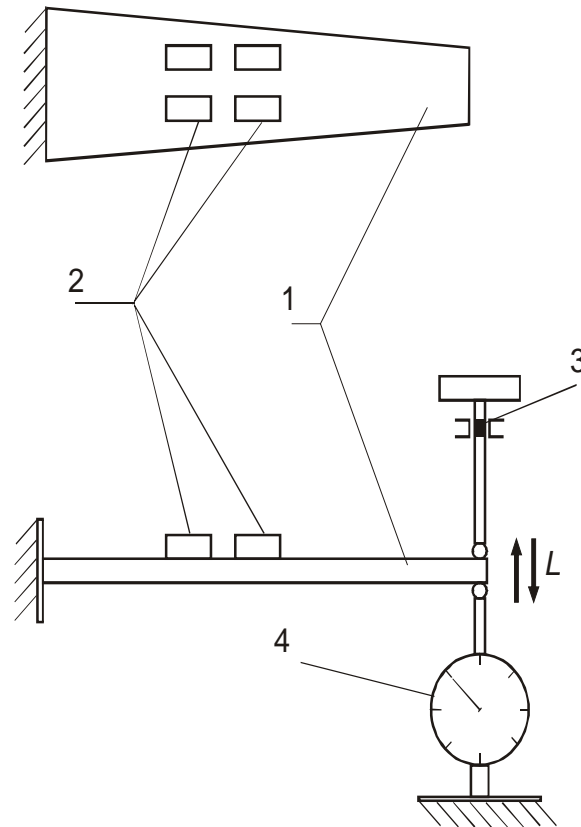


Рисунок 1.33 – Механічна схема тарувальної установки

Відомо [3, 4], що деформація поверхні балки рівного опору  $\varepsilon_b$ , а отже й тензорезистора  $\varepsilon_R$ , пов'язана з переміщенням вільного кінця балки в такий спосіб

$$\varepsilon_b = h \cdot a^2 \cdot l,$$

де товщина балки  $h = 3$  мм; довжина балки  $a = 200$  мм; переміщення вільного кінця балки  $l = (0 - 5)$  мм. Напряга  $U_m$  у вимірювальній діагоналі моста вимірюється вольтметром і може бути визначена за формулою:

$$U_m \approx U_p \cdot 4^{-1} \cdot k \cdot \varepsilon_b = U_p \cdot 4^{-1} \cdot \varepsilon_R, \quad (1.38)$$

де  $U_p = 5\text{В}$  – напруга живлення моста,

$\varepsilon_R$  – відносна зміна опору тензорезистора.

Із цього виразу можуть бути визначені  $\varepsilon_R$  й  $k$ . Для визначення дійсних значень цих величин необхідно зробити 5-10 аналогічних вимірювань і знайти середні арифметичні значення (наприклад  $\bar{\varepsilon}_R$ ).

Обчислення похибки результатів вимірювань значень  $\varepsilon_R$  і  $k$ , викликані розкидом тензочутливості тензорезисторів усередині серії, здійснюється шляхом математичної обробки отриманих значень із використанням залежності:

$$S = 0,6745 \cdot \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \right) (n \cdot (n-1))^{-1}} \cdot \varepsilon_R^{-1} \cdot 100 \%, \quad (1.39)$$

де  $S$  – похибка результату вимірювання для тензорезисторів даної серії;  
 $\sigma = \bar{\varepsilon}_R - \varepsilon_i$  – залишкова похибка.

Похибка  $S$  є критерієм придатності тензорезисторів для вимірювань, у кращих зразків фольгових датчиків вона не перевищує 0,2 %. Серія тензорезисторів, у яких  $S$  перевищує 0,5 – 1 %, розглядається як непридатна для практичних цілей.

Підбір пар тензорезисторів для мостових вимірювальних схем можна здійснити також, включивши два закріплені на поверхні балки тензорезистори, наприклад  $R5$ ,  $R7$ . Після попереднього балансування моста й деформації тензорезисторів шляхом переміщення кінця вимірювальної балки в діапазоні 0-5 мм, через кожні 0,5 мм, визначити, за показниками цифрового вольтметра, максимальне значення напруги  $U_{\text{мм}}$  розбалансу моста. За значенням  $U_{\text{мм}}$  визначають відповідно до формул (1.38), (1.39) різницю коефіцієнтів тензочутливості й різницю зміни опорів досліджуваних тензорезисторів. У випадку повної ідентичності цих характеристик тензорезисторів напруга розбалансу моста повинна дорівнювати нулю.

Усі ці операції здійснюються в тому випадку, якщо тензорезистори використовуються безпосередньо для вимірювання лінійної деформації. Якщо вони виконують роль чутливих елементів у складі датчиків для вимірювання, наприклад, тиску, вібрації, прискорення, то перед

використанням необхідно зробити тільки їхню перевірку за номінальним опором і його зміною при деформації за допомогою цифрового омметра.

Розкид значень коефіцієнтів тензочутливості усередині серії тензорезисторів не позначиться на точності вимірювань, тому що в цьому випадку є пряма залежність між імітованою фізичною величиною (тиском, переміщенням і т.д.) і збільшенням опору тензочутливого елемента. Розходження в коефіцієнті тензочутливості враховується й входить у тарувальний коефіцієнт.

За допомогою розглянутої установки можуть бути визначені також параметри інших типів тензорезисторів (дротових, напівпровідникових) і досліджені характеристики їхніх вимірювальних схем.

### **Дослід 1. Порядок виконання досліду**

1. Включити іспитовий стенд і цифровий вольтметр (ЦВ) у мережу.
2. Зібрати схему повного моста (рис. 1.33)
3. Реостат встановити в нульове положення.
4. Встановити нульове значення на ЦВ.
5. Включити міст у схему, натиснувши кнопку «Мережа», утримуючи її натиснутою, збалансувати міст, для чого необхідно обертати реостат.
6. Обертаючи ручку, механічно з'єднану зі штоком, що переміщає вільний кінець балки, перемістити вільний кінець балки на 0,5 мм, що буде відзначено на мікрометрі.
7. Нажати кнопку «Мережа», утримуючи її зняти три показання зі шкали ЦВ. Для цього на панелі ЦВ перемикач перевести в стан ручного вимірювання і, нажавши і відпустивши кнопку КЗ зробити зняття показань; потім перемикач повернути в положення автоматичного виміру.
8. Аналогічно пунктам 6 і 7 виконати вимірювання для діапазону 0–3,5 мм через кожні 0,5 мм, отримані дані занести в табл. 1.24.

Таблиця 1.24 – Результати дослідів

	0	1	2	3	4	5	6	7
$l$ , мм	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$U_1$ , В								
$U_2$ , В								
$U_3$ , В								
$\bar{U}$ , В								

Визначити й занести в табл. 1.24 середні значення напруги за формулою

$$\bar{U} = \frac{1}{3}[U_1 + U_2 + U_3] \quad (1.40)$$

Визначити рівняння градуовальної характеристики перетворювача  $U = f(l)$  за отриманими значеннями. Це рівняння являє собою лінійну функцію, визначену за вісьмома ( $n = 8$ ) значеннями  $\bar{U}$ . Відповідно до методу найменших квадратів воно має вигляд:

$$U_r(1) = U_r(1_0) + S \cdot l = \bar{U}_d - S \cdot (\bar{l} - 1), \quad (1.41),$$

де  $\bar{U}_d = \frac{1}{8}[\bar{U}_d(5) + \bar{U}_d(1) + \dots + \bar{U}_d(7)]$  – середнє значення  $U$ ;

$\bar{l} = \frac{1}{2}[3,5 + 0] = 1,75$  – середнє значення деформації;

$\Delta l$  – крок за шкалою мікрометра;

$U_r(1) = \bar{U}_d - S \cdot \bar{l}$  – значення вихідної напруги перетворювача при  $l = 0$  мм;

$S = [\bar{U}_d(4) - \bar{U}_d(3) + 3 * [\bar{U}_d(5) - \bar{U}_d(2)] + 5 * [\bar{U}_d(6) - \bar{U}_d(1)] + 7 * [\bar{U}_d(7) - \bar{U}_d(0)]] * 6 [n(n^2 + 1) * \Delta l]$   
– чутливість перетворювача, В/мм.

Таблиця 1.25 – Результати дослідів

$l$ , мм	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\bar{U}_d(l)$ , В								
$U_r(l)$ , В								
$\gamma_r$ , %			0					

Підставляючи в рівняння градуовальної характеристики значення деформації, наведені в табл. 1.25, визначити й занести в цю таблицю градуовальні значення напруг  $U_{\Gamma}(l)$ , що відповідають цим деформаціям. За отриманими значеннями  $U_{\Gamma}(l)$  і  $\bar{U}_{\text{д}}(l)$  визначити й занести в табл. 1.25 значення відносних похибок перетворювача для кожної точки деформації.

$$\gamma_{\Gamma} = \frac{U_{\Gamma}(l) - \bar{U}_{\text{д}}(l)}{U_{\Gamma}(3,5) - U_{\Gamma}(0)} \cdot 100 \% ,$$

де  $U_{\Gamma}(l)$  – значення вихідної частоти перетворювача, отримане з рівняння (1.41).

$\bar{U}_{\text{д}}(l)$  – дійсне значення вихідної напруги перетворювача, отримане з експериментальних даних.

$U_{\Gamma}(l_{\text{н}})$ ,  $U_{\Gamma}(l_{\text{к}})$  – вихідна напруга перетворювача, що відповідає початковому  $l_{\text{н}}$  й кінцевому  $l_{\text{к}}$  значенням вимірюваної деформації.

### **Зміст звіту**

Механічна схема тарувальної установки (с. 1.32); електрична схема установки (рис. 1.33); таблиці експериментальних даних (табл. 1.24, 1.25).

### **Контрольні запитання**

1. Призначення й принцип дії установки для тарування тензорезисторів.
2. Конструкція й електрична схема тарувальної установки.
3. Пояснити принцип дії тензорезисторів.
4. Пояснити причини виникнення похибок тензорезисторів.
5. Електрична схема установки.
6. Порядок повірки тензорезисторів.



## Практична робота №9

### АЛГОРИТМІЧНА КОМПЕНСАЦІЯ ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК ІНФОРМАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ У ВИМІРЮВАЛЬНОМУ КАНАЛУ

#### 1.1. Теоретичні відомості

Важливою умовою ефективної компенсації похибок є наявність апріорної інформації про властивості вимірювальної інформації. Для різних методів алгоритмічної компенсації похибок може бути використана така апріорна інформація:

– спектральна щільність і кореляційна функція випадкових похибок, наявних на відеозображенні:

$$S_{\xi}(j\omega_1, j\omega_2) = |F_T(\xi(x, y))|^2; \quad K_{\xi} = F_T^{-1}(S_{\xi}(j\omega_1, j\omega_2));$$

– спектральна щільність і кореляційна функція вимірювальної інформації

$$S_{f_0}(j\omega_1, j\omega_2) = |F_T(f_0(x, y))|^2; \quad K_{f_0} = F_T^{-1}(S_{f_0}(j\omega_1, j\omega_2));$$

– співвідношення сигнал/шум в пристрої формування відеозображень (ПФВЗ)

$$\Psi_{\text{н/ш}} = 20 \cdot \lg \frac{A_{\text{max}}}{\sigma_{\xi}},$$

де  $\sigma_{\xi}$  – середньоквадратичне значення напруги шуму,  $A_{\text{max}}$  – максимально можливе значення амплітуди відеозображення (для 8-розрядного цифрового коду  $A_{\text{max}} = 255$  д.р.).

Отримання повних апріорних відомостей про вимірювальну інформацію є складною задачею, так як в загальному випадку початкова вимірювальна інформація (двовимірний масив  $f_0(x, y)$ ) невідома, а для вимірювань доступне тільки спотворене відеозображення  $f_1(n, m)$  на виході ПФВЗ.

Для оцінки ефективності застосування методів алгоритмічної компенсації похибок потрібно визначити критерії, за якими оцінюються результати компенсації. Відомі типові критерії оцінки вірності передачі та відтворення аналогових і цифрових відеозображень. Ці критерії орієнтовані на оцінку амплітудних похибок та візуальної якості відеозображень. Вказані критерії обчислюють середньоквадратичне значення похибки відтворення амплітуди відеосигналу на виході вимірювального каналу.

В приладовій системі для оцінки величини похибок цифрових відеозображень доцільно використовувати їх дискретні відліки. Основними амплітудними критеріями, що дають узагальнену картину похибок цифрового відеозображення  $\hat{f}_0(n, m)$ , є:

– середньоквадратичне значення похибки відтворення амплітуди відеосигналу на виході вимірювального каналу

$$\sigma_{\Delta f} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{n,m} (\hat{f}_0(n,m) - f_0(n,m))^2}, \quad (1.1)$$

де  $f_0(n,m)$  – дискретні відліки початкового двовимірного масиву  $f_0(x,y)$ ;  
– співвідношення сигнал/шум на виході вимірювального каналу

$$\Psi_{\hat{a}\hat{e}} = -10 \lg \frac{\sum_{n,m} (\hat{f}_0(n,m) - f_0(n,m))^2}{\sum_{n,m} (f_0(n,m))^2}; \quad (1.2)$$

– пікове співвідношення сигнал/шум на виході вимірювального каналу

$$\Psi_{\hat{a}\hat{e}i} = -10 \lg \frac{\frac{1}{MN} \sum_{n,m} (\hat{f}_0(n,m) - f_0(n,m))^2}{A_{\max}^2}. \quad (1.3)$$

Для кольорових відеозображень в формулах (1.1) – (1.3) потрібно враховувати наявність декількох каналів. В цьому випадку формула (1.1) набуває вигляду:

$$\sigma_{\Delta f} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{n,m} \sum_r k_r (\hat{f}_0(n,m,r) - f_0(n,m,r))^2},$$

де  $r$  – номер каналу кольорового відеозображення у відповідності з обраною колориметричною системою, звичайно  $r=1, 2, 3$ ,

$k_r$  – вагові коефіцієнти, що враховують роль кожного каналу кольорового відеозображення у передачі вимірювальної інформації,  $\sum_r k_r = 1$ , у

найпростішому випадку  $k_1 = k_2 = k_3 = 1/3$ .

Це є загальна оцінка похибок всього відеозображення. При цьому похибка відтворення кожного дискретного значення амплітуди відеосигналу розглядається незалежно від похибок відтворення сусідніх дискретних значень. Такий підхід дозволяє з високою точністю дати загальну оцінку похибок яскравості і кольору ОБ, що наявні на сформованому відеозображенні.

Однак, при оцінці похибок відеозображень з вимірювальною інформацією про геометричні параметри (ГП) необхідно в першу чергу враховувати викривлення форми перепадів амплітуди відеосигналу, що відповідають контурам ОБ. Оскільки в амплітудних критеріях вказані викривлення не враховуються безпосередньо, то оцінка похибок відеозображень з вимірювальною інформацією на основі амплітудних критеріїв має низьку точність та об'єктивність. Окрім того, кількісну оцінку похибок ГП доцільно виражати в одиницях просторових координат відеозображення, а не в одиницях амплітуди відеосигналу.

Таким чином, суттєвим недоліком амплітудних критеріїв є низька точність оцінки вимірювальної інформації про ГП.

Тому для оцінки точності вимірювання ГП на відеозображенні пропонуються такі показники:

- похибки визначення лінійних розмірів ОБ  $\Delta_h, \Delta_l$ ;
- похибки визначення координат центра мас ОБ  $\Delta_{x_c}, \Delta_{y_c}$ ;
- похибка визначення площі ОБ  $\Delta_S$ ;
- похибка визначення координат контурних точок ОБ

$$\Delta_{\text{еііò}} = \frac{\sum_{n,m} \hat{f}_{0\text{ñáâ}}(n,m) \oplus f_{0\text{ñáâ}}(n,m)}{l_{\text{еііò}}}, \quad (1.4)$$

де

$$f_{0\text{ñáâ}}(n,m) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } f_0(n,m) \in Q_{\hat{I}\hat{A}}, \\ 0, & \text{якщо } f_0(n,m) \notin Q_{\hat{I}\hat{A}}, \end{cases} \quad \hat{f}_{0\text{ñáâ}}(n,m) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \hat{f}_0(n,m) \in \hat{Q}_{\hat{I}\hat{A}}, \\ 0, & \text{якщо } \hat{f}_0(n,m) \notin \hat{Q}_{\hat{I}\hat{A}} \end{cases}$$

результат розподілу на ОБ і фон (сегментації) початкового двовимірного масиву  $f_0(n,m)$  та його алгоритмічної оцінки  $\hat{f}_0(n,m)$ , отриманої в результаті компенсації похибок,  $Q_{\hat{I}\hat{A}}$  і  $\hat{Q}_{\hat{I}\hat{A}}$  – множини точок, що належать ОБ відповідно у початковому двовимірному масиві  $f_{\text{ñáâ}}(n,m)$  та у його алгоритмічній оцінці  $\hat{f}_{\text{ñáâ}}(n,m)$ ,  $\oplus$  – логічна операція визначення суми за модулем 2;  $l_{\text{еііò}}$  – сумарна довжина контуру ОБ в д.т.

Вимірювальний канал приладової системи складається з двох основних частин:

– ПФВЗ з частотною передаточною функцією  $W_f(j\omega_1, j\omega_2)$ , що вносить похибки у відеозображення;

– цифрової ЕОМ з частотною передаточною функцією  $W_{\text{аеа}}(j\omega_1, j\omega_2)$ , що компенсує похибки відеозображень з вимірювальною інформацією.

Цифрова ЕОМ виконує алгоритмічну компенсацію (фільтрацію) випадкових похибок відеозображень, що виникають в ПФВЗ. Фільтрацію двовимірних сигналів розглянуто в багатьох наукових працях. Частотна передаточна функція оптимального фільтра випадкових похибок відеозображень дорівнює:

$$W_{\text{еа}}(j\omega_1, j\omega_2) = \frac{S_{f\ddot{A}}(\omega_1, \omega_2)}{S_{f\ddot{A}}(\omega_1, \omega_2) + S_{\xi}(\omega_1, \omega_2)}, \quad (1.5)$$

де  $S_{f\ddot{A}}(\omega_1, \omega_2)$  – спектральна щільність вимірювальної інформації  $f_{\ddot{A}}(x, y)$  з динамічними і геометричними похибками на виході ПФВЗ,  $S_{\xi}(\omega_1, \omega_2)$  – спектральна щільність випадкових похибок  $\xi(x, y)$  на виході цього пристрою.

Розглянемо відеозображення ОБ з кореляційною функцією та їх випадкові похибки з кореляційною функцією. Цим кореляційним функціям відповідають спектральні щільності:

$$\begin{aligned}
S_{f\ddot{A}}(\omega_1, \omega_2) &= \frac{2D_{f\ddot{A}}}{\alpha_x \alpha_y} \cdot \frac{1}{1 + \omega_1^2 / \alpha_x^2 + \omega_2^2 / \alpha_y^2}, \\
S_{\xi}(\omega_1, \omega_2) &= \frac{2D_{\xi}}{\alpha_{x\xi} \alpha_{y\xi}} \cdot \frac{1}{1 + \omega_1^2 / \alpha_{x\xi}^2 + \omega_2^2 / \alpha_{y\xi}^2},
\end{aligned}
\tag{1.6}$$

де  $D_{f\ddot{A}}$  та  $D_{\xi}$  – дисперсії вимірювальної інформації та випадкових похибок.

Розглянемо відеозображення ОВ з кореляційною функцією. Цим кореляційним функціям відповідають спектральні щільності:

$$S_{f\ddot{A}}(\omega_1, \omega_2) = \frac{4D_{f\ddot{A}}\alpha_x\alpha_y}{(\alpha_x^2 + \omega_1^2) \cdot (\alpha_y^2 + \omega_2^2)}, \quad S_{\xi}(\omega_1, \omega_2) = \frac{4D_{\xi}\alpha_{x\xi}\alpha_{y\xi}}{(\alpha_{x\xi}^2 + \omega_1^2)(\alpha_{y\xi}^2 + \omega_2^2)}. \tag{1.7}$$

Приклад спектральних щільностей вимірювальної інформації та її випадкових похибок згідно формул (1.6) і (1.7) наведено в табл. В.1 та на рис. В.1. Початкові дані та результати розрахунку частотних характеристик оптимального фільтра для компенсації випадкових похибок відеозображень згідно формул (1.5) і (1.7) наведено в табл. В.1, В.2 та на рис. 1.1.

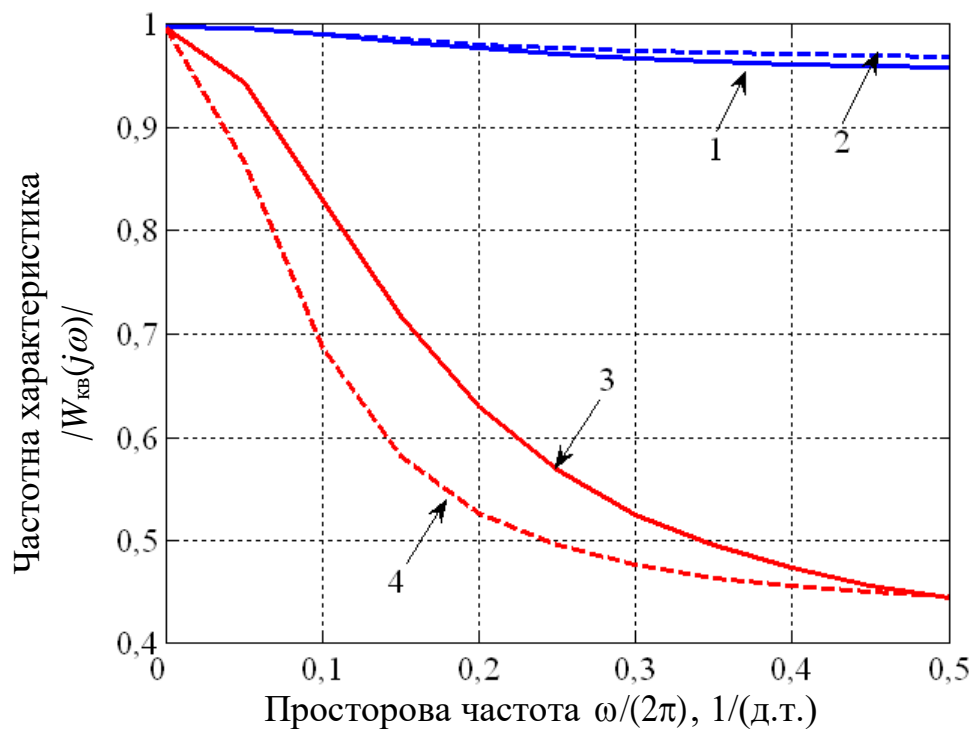


Рис. 1.1. Частотна характеристика оптимального фільтра для компенсації випадкових похибок на відеозображенні виробу з граніту Покостівського родовища: цифровий фотоапарат Sony Cyber-Shot DSC-H9, нормальні умови вимірювань,  $\psi_{\tilde{n}/\phi} = 55$  дБ (1 – вздовж осі  $Ox$ ; 2 – вздовж осі  $Oy$ ); відеокамера Panasonic M3000, робочі умови вимірювань на виробництві,  $\psi_{\tilde{n}/\phi} = 40$  дБ (3 – вздовж осі  $Ox$ ; 4 – вздовж осі  $Oy$ )

Перевагою формул (1.7) є можливість розділення виразів для спектральних щільностей та частотної передаточної функції оптимального фільтра на дві частини, кожна з яких залежить тільки від однієї просторової частоти  $\omega_1$  або  $\omega_2$ . Такий підхід дозволяє організувати алгоритмічну обробку відеозображень окремо по рядкам і стовпцям, зменшивши при цьому кількість обчислювальних операцій. В результаті значно підвищується швидкодія приладової системи. Такий підхід використано в розділі 5 для алгоритмічної компенсації випадкових і динамічних похибок на основі штучних нейронних мереж.

## 1.2. Початкові дані варіантів індивідуальних завдань

Таблиця 1

Початкові дані для розрахунку оптимального фільтра для компенсації випадкових похибок відеозображень з вимірювальною інформацією про ГП виробів

Варіант	Початкові дані для розрахунку					
	Корисний сигнал вимірювальної інформації			Випадкові викривлення (шум)		
	Параметр кореляційної функції $\alpha_x$ , (д.т.) <sup>-1</sup>	Параметр кореляційної функції $\alpha_y$ , (д.т.) <sup>-1</sup>	Середньоквадратичне значення амплітуди $\sigma_{f2}$ , д.р.	Параметр кореляційної функції $\alpha_{x\xi}$ , (д.т.) <sup>-1</sup>	Параметр кореляційної функції $\alpha_{y\xi}$ , (д.т.) <sup>-1</sup>	Середньоквадратичне значення амплітуди $\sigma_\xi$ , д.р.
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
1	0,262	0,231	49,1	1,446	1,277	4,8
2	0,074	0,067	18,6	1,652	0,881	3,3
3	0,252	0,301	39,1	3,546	2,277	5,8
4	0,064	0,037	28,6	1,552	0,881	3,9
5	0,292	0,370	29,1	3,346	3,277	4,0
6	0,087	0,057	17,6	1,352	0,881	2,7
7	0,362	0,391	40,1	4,746	4,277	6,8
8	0,074	0,047	8,6	1,652	0,881	2,3
9	0,262	0,331	49,1	1,446	1,277	4,8
10	0,060	0,057	10,6	1,452	0,681	2,9
11	0,240	0,231	49,1	1,446	1,277	4,8
12	0,070	0,067	18,6	1,652	0,881	3,3
13	0,242	0,301	39,1	3,546	2,277	5,8
14	0,049	0,037	28,6	1,552	0,881	3,9
15	0,330	0,370	29,1	3,346	3,277	4,0
16	0,077	0,057	17,6	1,352	0,881	2,7
17	0,462	0,391	40,1	4,746	4,277	6,8
18	0,074	0,047	8,6	1,652	0,881	2,3
19	0,262	0,331	49,1	1,446	1,277	4,8
20	0,462	0,391	40,1	4,746	4,277	6,8
21	0,054	0,047	8,6	1,652	0,881	2,3
22	0,362	0,331	49,1	1,446	1,277	4,8
23	0,0454	0,057	10,6	1,452	0,681	2,9
24	0,242	0,301	39,1	3,546	2,277	5,8

### **1.3. Послідовність виконання роботи**

1. Проаналізувати початкові дані завдання, записати вирази спектральних щільностей корисного сигналу та випадкових похибок (шуму), частотної характеристики оптимального фільтра
2. Розробити програму для дослідження фільтрації шумів на зображенні оптимальним фільтром.
3. Вибрати приклад цифрового зображення об'єктів, для яких вимірюються геометричні параметри, та додати до нього випадкові викривлення з заданими параметрами (табл. 1).
4. Застосувати фільтрацію оптимальним фільтром до цифрового зображення.
5. Побудувати графіки спектральних щільностей сигналу та шуму, графік частотної характеристики оптимального фільтра.
6. Зробити висновки по роботі.

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: Підручник /В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Єременко та ін.; за ред. чл.-кор. НАН України В.П. Бабака / 2-е вид., перероб. і доп. – К.: Ун-т новітніх технологій; НАУ, 2017. – 496 с.
2. Бабак В.П. Обробка сигналів: Підручник // В.П. Бабак, В.С. Хандецький, Е. Шрюфер. – К.: Либідь, 1999. - 392 с.
3. Бабак В.П. Теоретичні основи захисту інформації: Підручник. – Книжкове вид-во НАУ, 2008. – 752 с.
4. Бабак В.П. Теорія ймовірностей, випадкові процеси та математична статистика: Підручник / В.П. Бабак, Б.Г. Марченко, М.Є. Фриз. – К.: Техніка, 2004. - 288 с.
5. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: Підручник / В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т. Володарський, В.В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013.–538 с.
6. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник у 2 т./М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 1300 с.
7. Поліщук Є.С. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: Підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, Б.І. Стадник та ін.; за ред. Є.С. Поліщука. – Львів: Вид-во Бескид Біт. 2012. – 618 с.